









RESPOSTAS FISIOLÓGICAS AGUDAS À “HIPÓXIA INTERMITENTE DE RECUPERAÇÃO” NO HIIT

ACUTE PHYSIOLOGICAL RESPONSES TO “RECOVERY INTERMITTENT HYPOXIA” IN HIIT

RESPUESTAS AGUDAS A LA “HIPOXIA INTERMITENTE DE RECUPERACIÓN” EN EL HIIT

Yan Figueiredo Foresti¹ 
(Profissional de Educação Física)
Carlos Dellavechia De Carvalho² 
(Profissional de Educação Física)
Felipe Alves Ribeiro¹ 
(Profissional de Educação Física)
Julia Causin Andreossi¹ 
(Profissional de Educação Física)
Gabriel Luches-Pereira¹ 
(Profissional de Educação Física)
Danilo Rodrigues Bertucci³ 
(Profissional de Educação Física)
Fúlvia de Barros Manchado-Gobatto⁴ 
(Profissional de Educação Física)
Marcelo Papoti^{1,2,3} 
(Profissional de Educação Física)

1. Universidade de São Paulo, Escola de Educação Física e Esporte de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, SP, Brasil.
2. Universidade de São Paulo, Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, SP, Brasil.
3. Universidade Estadual de São Paulo, Departamento de Educação Física, Rio Claro, SP, Brasil.
4. Universidade de Campinas, Faculdade de Ciências Aplicadas, Laboratório de Fisiologia Aplicada ao Esporte, Limeira, SP, Brasil.

Correspondência:

Yan Figueiredo Foresti
Universidade de São Paulo, Escola de Educação Física e Esporte de Ribeirão Preto. Avenida Bandeirantes, 3900, Vila Monte Alegre, Ribeirão Preto, SP, Brasil.
yan.foresti@alumni.usp.br

RESUMO

Introdução: O treinamento de hipóxia intermitente tradicional melhora o desempenho esportivo após curtos períodos de exposição, porém a exposição aguda à hipóxia intermitente leva à diminuição da intensidade do treinamento e da qualidade técnica. A solução para superar esses efeitos negativos pode ser realizar esforços em normóxia e os intervalos entre os esforços em hipóxia, mantendo a qualidade do treinamento e os benefícios da hipóxia. **Objetivo:** Este estudo teve como objetivo avaliar as respostas fisiológicas agudas à exposição de hipóxia durante a recuperação entre esforços de alta intensidade. **Materiais e métodos:** Estudo aleatório e one-blinded, com efeito placebo controlado. Dezesesseis homens realizaram um teste de exercício graduado para determinar sua intensidade máxima e duas sessões de treinamento intervalado de alta intensidade. Os intervalos de treinamento podem ser em hipóxia (TRH), FIO₂: 0,136 ou normóxia (TRN), FIO₂: 0,209. Durante os dois minutos de intervalo entre os dez esforços de um minuto, foram medidos constantemente a saturação periférica de oxigênio (SpO₂), frequência cardíaca (FC), lactato sanguíneo ([La]), glicemia ([Glu]). **Resultados:** Houve diferenças na FC (TRN = 120 ± 14 bpm; TRH = 129 ± 13 bpm, p < 0,01) e SpO₂ (TRN = 96,9 ± 1,0%; TRH = 86,2 ± 3,5%, p < 0,01). Sem diferenças em [La] e [Glu] TRN (4,4 ± 1,7 mmol.l⁻¹; 3,9 ± 0,5 mmol.l⁻¹) e TRH (5,2 ± 2,0 mmol.l⁻¹; 4,0 ± 0,8 mmol.l⁻¹, p = 0,17). **Conclusão:** Evidenciou-se a possibilidade de incluir a hipóxia apenas nos intervalos de recuperação como um estímulo adicional ao treinamento, sem diminuir a qualidade do treinamento. **Nível de Evidência II; Estudo Clínico Randomizado de Menor Qualidade.**

Descritores: Saturação de Oxigênio; Lactato; Treinamento Intervalado de Alta Intensidade; Hipóxia.

ABSTRACT

Introduction: Traditional intermittent hypoxia training improves sport performance after short periods of exposure, but acute exposure to intermittent hypoxia leads to decreased training intensity and technical quality. The solution to overcome these negative effects may be to perform efforts in normoxia and the intervals between efforts in hypoxia, maintaining the quality of training and the benefits of hypoxia. **Objective:** This study aimed to evaluate the acute physiological responses to hypoxia exposure during recovery between high intensity efforts. **Materials and methods:** Randomized, one-blind, placebo-controlled study. Sixteen men performed a graded exercise test to determine their maximal intensity and two sessions of high-intensity interval training. The training intervals could be in hypoxia (HRT), FIO₂: 0.136 or normoxia (NRT), FIO₂: 0.209. During the two-minute interval between the ten one-minute efforts, peripheral oxygen saturation (SpO₂), heart rate (HR), blood lactate ([La]), blood glucose ([Glu]) were constantly measured. **Results:** There were differences in HR (TRN = 120 ± 14 bpm; TRH = 129 ± 13 bpm, p < 0.01) and SpO₂ (TRN = 96.9 ± 1.0%; TRH = 86.2 ± 3.5%, p < 0.01). No differences in [La] and [Glu] TRN (4.4 ± 1.7 mmol.l⁻¹; 3.9 ± 0.5 mmol.l⁻¹) and TRH (5.2 ± 2.0 mmol.l⁻¹; 4.0 ± 0.8 mmol.l⁻¹, p = 0.17). **Conclusion:** The possibility of including hypoxia only in the recovery intervals as an additional stimulus to the training, without decreasing the quality of the training, was evidenced. **Level of Evidence II; Randomized Clinical Trial of Minor Quality.**

Keywords: Oxygen Saturation; Lactate; High-Intensity Interval Training; Hypoxia.

RESUMEN

Introducción: El entrenamiento tradicional en hipoxia intermitente mejora el rendimiento deportivo tras cortos periodos de exposición, sin embargo, la exposición aguda a la hipoxia intermitente conduce a una disminución de la intensidad del entrenamiento y de la calidad técnica. La solución para superar estos efectos negativos puede ser realizar los esfuerzos en normoxia y los intervalos entre esfuerzos en hipoxia, manteniendo la calidad del entrenamiento y los beneficios de la hipoxia. **Objetivo:** Este estudio pretendía evaluar las respuestas fisiológicas agudas a la exposición a la hipoxia durante la recuperación entre esfuerzos de alta intensidad. **Materiales y métodos:** Estudio aleatorizado, a ciegas y controlado con placebo. Dieciséis hombres realizaron una prueba de ejercicio graduado para determinar su intensidad máxima y dos sesiones de entrenamiento por intervalos de alta intensidad. Los intervalos de entrenamiento podían ser en hipoxia (HRT), FIO₂: 0,136 o normoxia (NRT), FIO₂: 0,209. Durante el intervalo de dos minutos entre los diez esfuerzos de un minuto, se midieron constantemente la saturación periférica de oxígeno (SpO₂), la frecuencia cardíaca (FC), el lactato en sangre ([La]) y la glucemia ([Glu]). **Resultados:** Hubo diferencias en



la FC (TRN = 120 ± 14 lpm; TRH = 129 ± 13 lpm, $p < 0,01$) y la SpO₂ (TRN = 96,9 ± 1,0%; TRH = 86,2 ± 3,5%, $p < 0,01$). No hubo diferencias en [La] y [Glu] TRN (4,4 ± 1,7 mmol.l-1; 3,9 ± 0,5 mmol.l-1) y TRH (5,2 ± 2,0 mmol.l-1; 4,0 ± 0,8 mmol.l-1, $p = 0,17$). Conclusión: Se evidenció la posibilidad de incluir hipoxia sólo en los intervalos de recuperación como estímulo adicional al entrenamiento sin disminuir la calidad del mismo. **Nivel de Evidencia II; Ensayo Clínico Aleatorizado de Baja Calidad.**

Descriptor: Saturación de Oxígeno; Lactato; Entrenamiento de Intervalos de Alta Intensidad; Hipoxia.

DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1517-8692202430022021_0499p

Artigo recebido em 20/04/2022 aprovado em 15/12/2022

INTRODUÇÃO

O treinamento em hipoxia intermitente (THI) consiste em realizar esforços contínuos ou intervalados em hipoxia, além de intercalar exposições a hipoxia passiva e normoxia de forma intermitente ao longo do dia.¹⁻³ A utilização da hipoxia intermitente como um estímulo adicional ao treinamento e frequentemente utilizado em esportes cíclicos.³

Estudos demonstram a eficácia do THI em aumentar o desempenho esportivo em curtos períodos de tempo (3 a 5 semanas de treino), além de proporcionar adaptações anaeróbicas,⁴ como, alterações no pH, aumento da anidrase carbônica, melhora nos transportadores de glicose e maior atividade da via do HIF1 α dentro da musculatura estriada esquelética.³ Além disso, o THI foi eficiente para melhorar a economia de movimento, máximo consumo de oxigênio (VO_{2MAX}) e capacidade de realizar sprints repetidos.⁴⁻⁷

Apesar do THI ser eficiente para gerar adaptações positivas, realizar treinamento em hipoxia acarreta na redução da intensidade do exercício e diminuição na qualidade técnica, redução na potência gerada e diminuição da quantidade de esforços realizados, quando comparado a situação em normoxia. Está diminuição na intensidade do exercício causada pela exposição a hipoxia poderia explicar a ausência de resultados positivos encontrado em alguns estudos.⁸⁻¹⁰

Desta forma a exposição a hipoxia resulta em um efeito paradoxal, ao mesmo tempo que a hipoxia pode gerar adaptações positivas, está exposição diminui a intensidade do exercício, comprometendo a qualidade do treino, podendo esta diminuição na intensidade resultar na ausência da melhora da performance ao final do treinamento em hipoxia.¹

Desta forma, realizar o THI com os esforços em normoxia e os intervalos entre esforços em hipoxia poderia ser um modelo alternativo para manter a intensidade do treinamento e qualidade técnica durante o treino. Está estratégia provavelmente geraria adaptações positivas tanto do treinamento regular, quanto da exposição a hipoxia, evitando os efeitos maléficis da exposição a hipoxia durante exercício. Entretanto, desconhecemos estudos que investigaram testar este modelo em uma sessão de treinamento. Portanto, este estudo teve como objetivo avaliar as respostas fisiológicas agudas à exposição à hipoxia durante a recuperação/intervalo entre esforços de alta intensidade. Nossa hipótese é de que este modelo poderia gerar adaptações fisiológicas em marcadores utilizados para verificar a intensidade do exercício, como concentração de lactato sanguíneo ([La]), frequência cardíaca (FC) e percepção subjetiva de esforço (PSE) superiores ao treinamento realizado em normoxia, sem diminuir a quantidade de esforços realizados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Participantes

16 homens adultos participaram do presente estudo (idade=23 ± 4 anos, altura= 180 ± 10 cm, peso= 78.4 ± 11.9 kg). Os participantes assinaram o termo de compromisso livre e esclarecido, todos procedimentos do presente estudo foram submetidos e aprovados pelo comitê de ética e pesquisa com seres humanos da universidade, além de estarem de acordo com a declaração de Helsinque.

Desenho experimental

Os participantes compareceram ao laboratório em três dias diferentes, com intervalos regulares de 48 horas entre os dias. Foi recomendado aos voluntários da pesquisa a manterem a mesma dieta antes de cada intervenção, comerem pelo menos duas horas antes do teste e evitar consumo de cafeína e álcool. Todos procedimentos foram realizados no mesmo período do dia. O laboratório está localizado a uma altitude de 531 metros do nível do mar, com temperatura controlada a 22° C durante todo o estudo. Nenhum dos participantes viajaram para altitudes superiores a 1500m do nível do mar nos últimos 6 meses.

Antes de cada intervenção foi realizado aquecimento padrão em esteira rolante (Super ATL, Imbrahmed, Brasil), consistindo de 5 minutos de esforço em intensidade equivalente a 7 km/h.

No primeiro dia foi mensurado peso, altura, os participantes foram familiarizados com a esteira e com os equipamentos utilizados para gerar hipoxia. Após o aquecimento foi realizado um teste incremental até a exaustão (GXT) para determinar a maior velocidade alcançada durante o teste (V_{PICO}). Nos outros dois dias os participantes realizaram sessões de treinamento intervalado em alta intensidade, com os intervalos entre os esforços estando em condição de normoxia (T_{RN}) ou de hipoxia (T_{RH}). As execuções das sessões de treino foram realizadas de forma aleatória e cega (*One-Blinded*)

Teste incremental até exaustão (GXT)

O GXT iniciou a uma velocidade de 8 km/h, com incrementos de 1 km/h a cada 2 minutos até a exaustão voluntária do avaliado. Entre cada estágio foi realizado intervalos de 30 segundos para coletas de sangue do lóbulo da orelha, medir a FC e PSE. Os critérios de exaustão adotados para o teste foram: a) [La] > 8,0 mmol/L; b) frequência cardíaca máxima próxima a frequência máxima predita (FC_{pred} = 208 - (0,7*idade); c) PSE >9 pontos em uma escala de esforço variando de 0 a 10 pontos.¹¹

A V_{PICO} foi considerada como a maior velocidade alcançada durante o GXT, quando a exaustão ocorreu antes do participante completar o tempo previsto por cada estágio a V_{PICO} foi ajustada utilizando a equação abaixo:¹²

$$V_{PICO} = VUE + (TR/TE) * I$$

Onde, VUE - velocidade do último estágio completo; TR - tempo realizado no estágio que ocorreu a exaustão; TE - Tempo de duração de cada estágio; I - incremento de intensidade entre estágios.

Instrumentação da hipoxia

Uma máscara unidirecional modelo *Air san* (Air Safety, Brasil) foi conectada a uma das extremidades de um tubo flexível de 3 metros (IVPU, air vacuum PU 1.1/2), no lado oposto do tubo foi conectada uma tenda normobárica (CAT, Tend, TM, EUA), com dimensões de 2 metros de largura, 3 metros de distância e 2 metros de altura (contendo uma capacidade de 12.000 litros de ar), a tenda estava conectada a um gerador de hipoxia (CAT-430TM, Altitude Control Technologies, USA). O

gerador manteve-se ligada durante todo o período do estudo, sendo ajustado uma fração expirada de oxigênio (FiO₂ = 0,135). Está FiO₂ foi constantemente monitorada utilizando um sensor de O₂ (Sensor de oxigênio, R-17MED, Teledyne Analytical Instruments, EUA). Na situação de normóxia os participantes utilizaram os mesmos equipamentos, entretanto respiraram ar ambiente (F_iO₂: 0.209), sem o conhecimento dos mesmos.

Sessão de Treino

Ambas as sessões de treino com os intervalos de recuperação em normóxia (T_RN) ou em hipóxia (T_RH) consistiram de 10 esforços de 1 minuto a 100% da V_{PICO}, com 2 minutos de intervalo passivo com ou sem exposição a hipóxia. Em ambas as sessões os participantes respiraram ar com concentrações de oxigênio de 0,209 ou 0,135, a FiO₂, RPE, [La], [Glu] foram constantemente medidas após o final de cada esforço, sendo que a FC e SpO₂ foram coletados a cada 10 segundos até os 120 segundos de intervalo (Figura 1).

Cálculo da dose de Hipóxia (DH)

A DH foi estimada levando em consideração o tempo de exposição em horas, multiplicado pela redução na SpO₂, assumindo um valor de repouso de 98% para a variável em questão. Assim, DH = (98 - SpO₂) x t.¹³

Cálculo da pressão parcial de oxigênio arterial (PaO₂)

Os valores de SpO₂ durante o treino foram convertidos para valores de PaO₂, utilizando a equação abaixo:¹⁴

$$PaO_2 = \left(\frac{23400}{\frac{1}{SpO_2} - 0.99} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Análise das amostras sanguíneas

As amostras de sangue foram coletadas utilizando tubos heparinizados e calibrados para coletar 25µl de sangue do lóbulo da orelha. As amostras foram dispensadas em tubos *Eppendorf*, contendo 50µl de fluoreto de sódio a 1%. As amostras foram congeladas em um freezer -20° C para posterior análise em um analisador de sangue (YLS, modelo 2700, Ohio, EUA) para determinar as concentrações de lactato ([La]) e glicose sanguíneas ([Glu]).

Análise estatística

A normalidade, homogeneidade e esfericidade dos dados foram verificadas utilizando os testes de Shapiro-Wilk, Levene e Mauchy

respectivamente. A correção de Greenhouse-Gesser foi utilizada quando necessário. Os dados foram expressos em média e desvio padrão da média. Para Comparar duas medidas o teste t Student para medidas dependentes foi utilizado. Para comparar a situação de normóxia e hipóxia em diferentes períodos a teste de variância (ANOVA) para medidas repetidas foi aplicado. Em caso de valores de F significativos, o pos-hoc de Sidak foi aplicado. O tamanho de efeito (ES) e seu 95% intervalo de confiança (C.I.) foi calculado e interpretado da seguinte forma: *trivial* <0,2, *Small* 0,2–0,6, *moderate* 0,6–1,2, *large* 1,2–2,0, e *very large* >2,0.

Apenas a variável PSE foi analisada utilizando de teste não paramétrico, para tanto o teste de *Wilcoxon Signed Rank*, foi aplicado, sendo considerado o valor do *Rank-Biserial correlation* (r_b) como medida de ES. Um valor de p de 0,05 foi adotado para todas as análises, todas estatísticas foram realizadas utilizando o *Software JASP* (versão 0.13.1.0, Amsterdam, Holanda).

RESULTADOS

A Figura 2, painel A, demonstra os valores de SpO₂ em todos os intervalos entre esforços, o painel B evidência as respostas da SpO₂ durante os intervalos entre esforços. Os valores médios de SpO₂ de todas as sessões de treino foram estatisticamente diferentes quando comparado T_RN (96,9 ± 1,0%) e T_RH (86,2 ± 3,5%, p < 0,01, ES = 3,04 C.I. = 1,85; 4,22). Enquanto que a diminuição média na SpO₂ foi de 1,1 ± 1,0% para T_RN e 11,8 ± 3,5% para T_RH (p < 0,01, ES= 3,04 C.I. = 1,85; 4,22).

Como esperado a DH para T_RN (0,35 ± 0,34%/h) foi inferior quando comparado ao T_RH (3,89 ± 1,17%/h, p < 0,01, ES= 3,04, C.I.= 1,85; 4,22). Os valores de SpO₂ convertidos em valores de PaO₂ estão apresentados na Figure 3. O T_RN apresentou valores superiores de PaO₂ quando comparado ao T_RH (p<0,01, ES= 3,991, C.I.= 2,88; 5,479).

As respostas da FC durante os intervalos estão apresentados na Figura 4. Os valores médios de FC para T_RN (120 ± 14 bpm) foram menores quando comparados os valores do T_RH (129 ± 13 bpm, p < 0,01, ES= 1,35, C.I.= 0,65; 2,02).

Nenhuma diferença estatística foi observada entre os valores de [Glu] entre exposições (T_RH= 4,0 ± 0,8 mmol/L, T_RN= 3,9 ± 0,5 mmol/L), apesar da não diferença estatística, numericamente foi possível observar que as [La] foram superiores em T_RH (5,2 ± 2,0 mmol/L) que em T_RN (4,4 ± 1,7 mmol/L) (Figura 5).

Não foi encontrada diferenças entre a PSE independente das situações T_RN (5,68 ± 2,12 pts.) e T_RH (6,06 ± 2,35 pts., p= 0,54, ES= 0,24, C.I. = -0,451; 0,775).

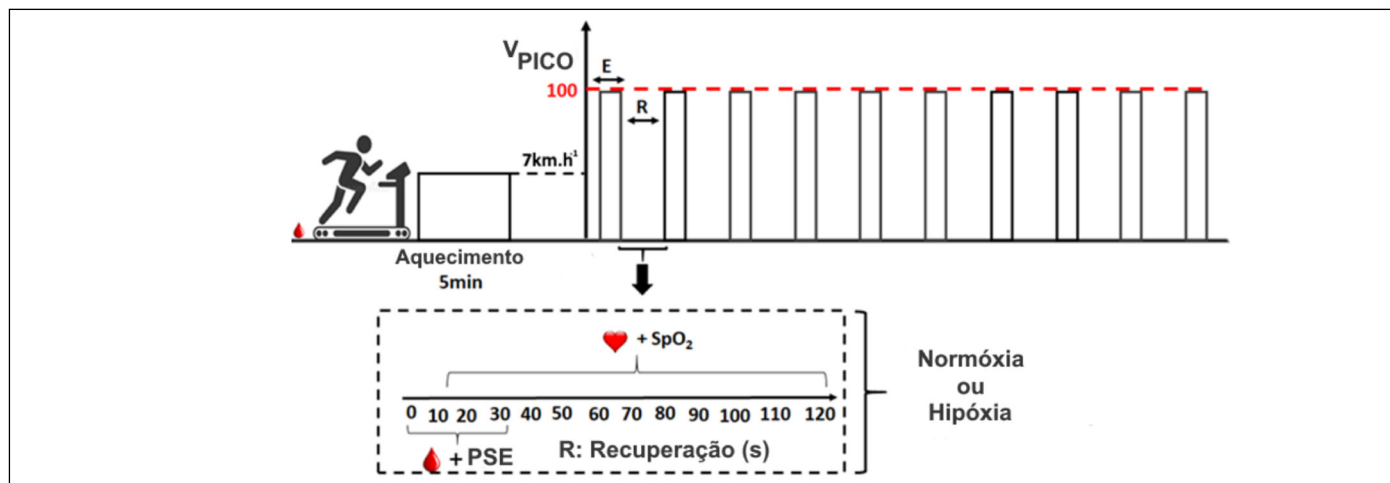


Figura 1. Representação da dinâmica da sessão de treinamento intermitente de alta intensidade com intervalos de recuperação em hipóxia ou normóxia. V_{PICO} – Máxima velocidade alcançada durante teste incremental; E – esforço; R- intervalo entre esforços; PSE- percepção subjetiva de esforço; SpO₂- pressão periférica de oxigênio, □ representa medida de frequência cardíaca; ● representa medidas de lactato sanguíneo.

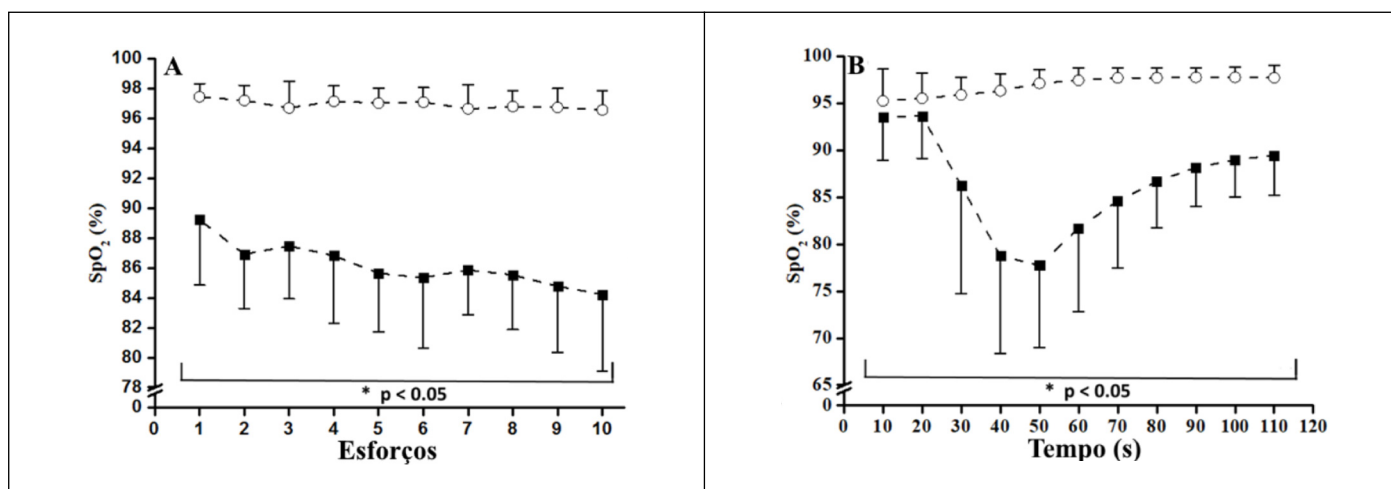


Figura 2. Comparação do comportamento da saturação média de oxigênio no sangue durante os intervalos de recuperação, nas diferentes sessões de treinamento; painel A - A comparação entre a média de SpO₂ de cada série, painel B - comportamento da SpO₂ durante o intervalo de 120 segundos. ■ representa o treinamento realizado com intervalos em hipóxia; ○ representa o treinamento realizado com intervalos em normóxia. * significa a diferença estatística de normóxia com situações de hipóxia ($p < 0,05$).

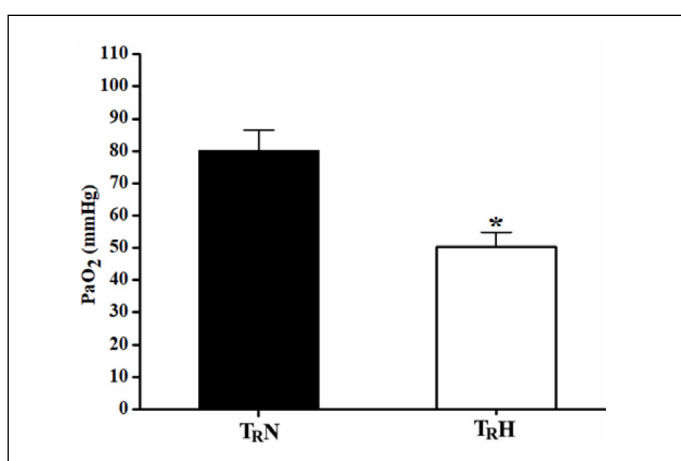


Figura 3. Comparação entre a pressão arterial de oxigênio (PaO₂) no treinamento intervalado realizado com intervalos em hipóxia (HR) e o treinamento intervalado realizado em normóxia (NN) situação de exposição à hipóxia em repouso e situação de hipóxia com treinamento intervalado de alta intensidade. * representa diferença estatística ($p < 0,05$).

DISCUSSÃO

O principal achado do presente estudo foi de que a sessão de treino intervalado em alta intensidade, com a adição da hipóxia durante os intervalos foi eficiente em gerar respostas fisiológicas agudas nos valores de SpO₂ e FC comparados as sessões em normóxia.

Assim, a inclusão da hipóxia pode ser considerada como um estímulo adicional ao treinamento confirmando a nossa hipótese. Sendo importante ressaltar que este modelo de exposição não alterou o esforço físico percebido, quando comparado ao grupo em normóxia. A alteração nos valores de PaO₂ apenas aconteceu na situação de hipóxia durante os intervalos.

Desconhecemos quaisquer outros estudos fora do nosso grupo de estudos que investigaram o efeito da hipóxia intermitente apenas nos intervalos. Existe apenas um único estudo que verifica o efeito da exposição à hipóxia durante a recuperação após uma sessão de treinamento.¹⁵ Os referidos autores aplicaram um treinamento submáximo contínuo e utilizaram uma recuperação de 30 minutos após o término do exercício.¹⁵ Assim, podemos considerar os dados do presente estudo como originais.

A exposição à hipóxia resulta em uma diminuição no suprimento de oxigênio corporal, causando alterações agudas, como diminuição da pressão alveolar, PaO₂, pressão capilar e diminuição da pressão intramuscular de oxigênio (P_iO₂).^{16,17}

Uma redução na P_iO₂ inferior a 8.00 mmHg foi suficiente para estabilizar o HIF1- α .¹⁸ Na normóxia, o PHD hidroxila o HIF1- α , possibilitando o acoplamento com a proteína de von Hippel-Lindau e marcando o complexo E3 ubiquitina ligase, para degradação do HIF1- α nos 265 proteossomas. Com a diminuição do PHD devido à diminuição do PiO₂, o HIF1- α se estabiliza, aumentando sua concentração dentro do citosol da célula, fazendo com que a proteína MAPK fosforile o HIF1- α . Essa proteína fosforilada se transloca para o núcleo da célula, conectando-se com o HIF1- β , formando o complexo HIF1- α /HIF1- β . Este complexo se conecta ao domínio HRE, aumentando a transcrição de várias outras proteínas que são responsáveis pelas adaptações positivas decorrentes da exposição à hipóxia.¹⁹⁻²¹

Um estudo utilizando uma FiO₂ de 10%, que é inferior ao nível utilizado neste estudo (FiO₂: 13,6%), os valores de PaO₂ em repouso foram 46 \pm mmHg, com respectivos valores de PiO₂ de 23 \pm 6 mmHg.¹⁶ Esses valores ficaram acima do necessário para a estabilização do HIF1 α , indicando que a hipóxia passiva não leva a adaptações na via do HIF-1 α . Corroborando, uma revisão sistemática mostrou que apenas a hipóxia passiva não foi eficiente em causar alterações aeróbias ou anaeróbias.²²

Outros estudos mostram que o exercício físico em normóxia realizado em alta intensidade pode diminuir os valores de PiO₂ de 35 mmHg para 3,1 mmHg, portanto, o exercício em alta intensidade per se parece ser suficiente para estabilizar esta via metabólica.^{16,17,23}

Estudos relataram valores de PaO₂ de 46 mmHg quando combinados exercícios de alta intensidade com hipóxia, com respectivos valores de PiO₂ de 2,3 mmHg, que são menores do que o necessário para a estabilização do HIF1 α .^{17,18} No presente estudo, quando a hipóxia foi adicionada durante os intervalos de repouso encontrou-se uma PaO₂ média de 50.26 \pm 4.57 mmHg.

Não podemos afirmar que a diminuição da oferta de oxigênio na sessão de treinamento proposta foi suficiente para estabilizar o HIF1- α , uma vez que não realizamos biópsias musculares para determinar sua concentração ou expressão. O valor médio de SpO₂ durante os intervalos foi semelhante ou inferior ao observado em estudos que demonstraram melhora no desempenho com THI, em comparação com o treinamento realizado em normóxia.^{3,6,24} Com base nas informações citadas, pode-se especular que a adição de hipóxia durante o intervalo é um estímulo adicional para otimizar ganhos fisiológicos, mas com a vantagem de manter a intensidade do esforço, uma vez que os esforços foram realizados em normóxia.

A DH foi maior nos períodos de recuperação em hipóxia, no entanto, a literatura fornece informações limitadas sobre a DH necessária para desencadear adaptações positivas.²⁵ A DH para uma determinada atividade

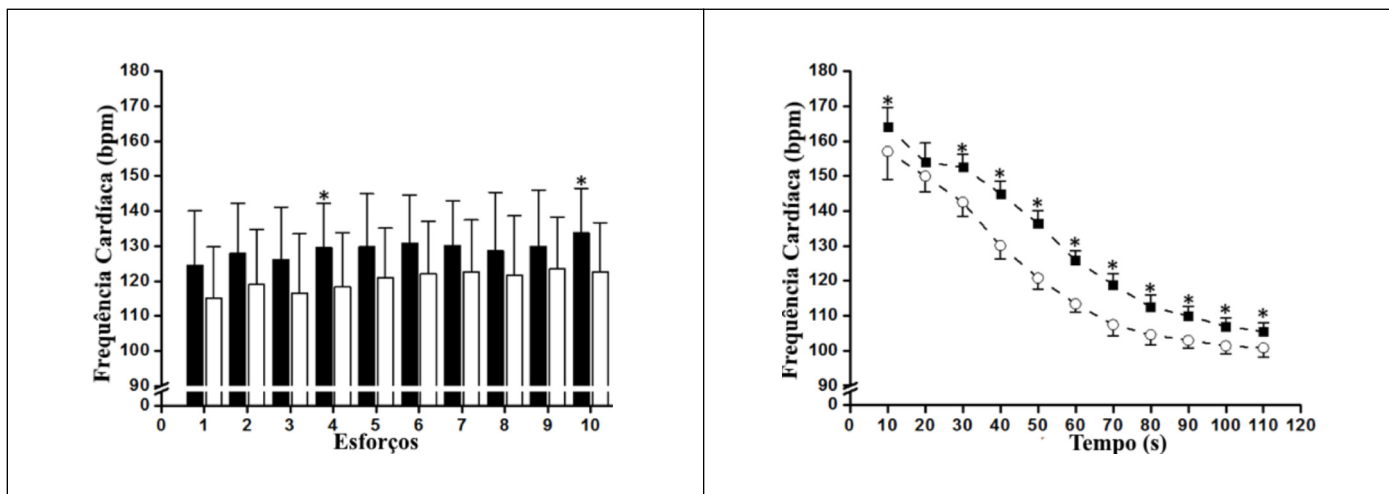


Figura 4. Comparação entre o comportamento da FC frequência cardíaca entre HR e normóxia. Painel A- Comparação entre a frequência média durante os intervalos entre os esforços. Painel B- Comparação do comportamento da frequência cardíaca durante o tempo de recuperação. Representa a sessão de treinamento em normóxia com recuperação entre os intervalos em hipóxia; □ representa a sessão de treinamento realizada em normóxia na intensidade máxima. * representa a diferença estatística entre as situações (p <0,05). ■ representa o treinamento realizado com intervalos em hipóxia; □ representa o treinamento realizado com intervalos em normóxia.

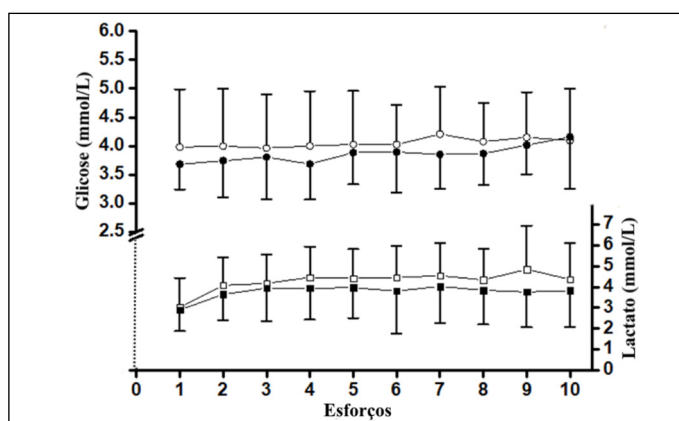


Figura 5. Comparação entre as concentrações de lactato sanguíneo e glicose durante os dez esforços de 1min nas diferentes sessões de treinamento. ■ Os símbolos pretos representam a sessão de treinamento em normóxia com recuperação entre os intervalos em hipóxia; □ Os símbolos brancos representam a sessão de treinamento realizada em normóxia na intensidade máxima.

parece depender tanto do tempo de exposição quanto da variação dos valores de SpO₂. Essa variação parece ser influenciada por diversos fatores, como idade, nível de treinamento e capacidade de manter o consumo de oxigênio em altitude e durante a resposta ventilatória à hipóxia. A resposta ventilatória de cada indivíduo pode alterar toda a cascata de consumo de oxigênio dos alvéolos ao PiO₂ muscular.^{16,26}

Ocorreu tendência do aumento das [La] em situação de HR, porém não foram encontradas diferenças estatísticas entre situações, resultado semelhante ao observado em sessão de THI.⁵ O aumento das [La] devido à hipóxia pode ser explicado, em parte, pelo maior uso das vias anaeróbicas para geração de energia, uma vez que a via aeróbia fica comprometida quando menos oxigênio é transportado para as células.²⁷ No presente estudo, a [Glu] manteve-se estável durante o treinamento, sugerindo que a hipóxia apenas na recuperação não foi suficiente para aumentar a demanda láctica para geração de energia. No entanto, alguns autores não relataram alterações na [La] após a hipóxia, um fenômeno conhecido como “paradoxo do lactato”.²⁸

A hipóxia pode causar redução na [Glu], acelerando a fadiga, consequentemente diminuindo o desempenho.²⁹ No presente estudo, todos

os participantes realizaram esforços sem diminuição da intensidade ou aumento de outros parâmetros associados à fadiga.

A FC foi frequentemente utilizada para determinar a carga interna de treinamento, nota-se que o HR foi eficaz na mudança da FC durante o período de recuperação, mostrando uma maior carga interna para NN, a manipulação da carga interna foi associada à melhora do desempenho.³⁰ Assim, adicionar hipóxia no treinamento parece ser uma alternativa para elevar a carga interna, sem aumentar a carga externa. Essa hipótese ainda precisa ser confirmada em estudos crônicos futuros. Além disso, estudos que manipulam cargas de treinamento durante a hipóxia têm relatado consistentemente benefícios adicionais em parâmetros relacionados ao desempenho.^{4,5}

O presente estudo apresenta algumas limitações: os sujeitos não realizaram uma sessão de treinamento inteiramente em hipóxia ou outras combinações possíveis, embora nosso objetivo fosse evitar que toda a sessão fosse realizada com baixa disponibilidade de O₂ pelos motivos relatados anteriormente. Nenhuma biópsia muscular foi realizada para determinar os parâmetros biomoleculares.

CONCLUSÃO

Concluímos que a hipóxia durante os intervalos entre os esforços pode ser um estímulo adicional e inovador para o treinamento intervalado de alta intensidade, sem prejudicar a execução dos esforços físicos e carga externa de treinamento, mantendo a intensidade dos esforços, além disso, este modelo agudo mostrou-se eficaz na promoção de alterações fisiológicas agudas substanciais, entretanto torna-se necessário comparar este novo protocolo de treinamento com o protocolo convencional que utiliza hipóxia durante toda a sessão de treino.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer todos os participantes que participaram deste estudo, bem como a Escola de Educação Física e Esporte de Ribeirão Preto (EEFERP/USP).

Todos os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES: Todos os autores contribuíram de forma individual significativa para: a) Contribuição substancial na concepção ou desenho do trabalho, aquisição, análise ou interpretação dos dados para o trabalho –Redação do trabalho ou revisão crítica do seu conteúdo intelectual; b) Aprovação final da versão do manuscrito a ser publicado; c) Estar de acordo em ser responsabilizado por todos os aspectos do trabalho, no sentido de garantir que qualquer questão relacionada à integridade ou exatidão de qualquer de suas partes sejam devidamente investigadas e resolvidas. YFF; CDC; FAR; JCA; GLP; DRB; FBMG, MP.

REFERÊNCIAS

1. Sinex JA, Chapman RFJoS, Science H. Hypoxic training methods for improving endurance exercise performance. *J Sport Health Sci.* 2015;4(4):325-32.
2. Millet GP, Roels B, Schmitt L, Woorons X, Richalet JJSm. Combining hypoxic methods for peak performance. *Sports Med.* 2010;40(1):1-25.
3. Faiss R, Girard O, Millet GP. Advancing hypoxic training in team sports: from intermittent hypoxic training to repeated sprint training in hypoxia. *Br J Sports Med.* 2013;47(Suppl 1):i45-i50.
4. Czuba M, Wilk R, Karpirski J, Chalimoniuk M, Zajac A, Langfort J. Intermittent hypoxic training improves anaerobic performance in competitive swimmers when implemented into a direct competition mesocycle. *PLoS One.* 2017;12(8):e0180380.
5. Czuba M, Waskiewicz Z, Zajac A, Poprzecki S, Cholewa J, Rocznik R. The effects of intermittent hypoxic training on aerobic capacity and endurance performance in cyclists. *J Sports Sci Med.* 2011;10(1):175-83.
6. Galvin HM, Cooke K, Sumners DP, Mileva KN, Bowtell JLBJSM. Repeated sprint training in normobaric hypoxia. *Br J Sports Med.* 2013;47(Suppl 1):i74-i9.
7. Katayama K, Sato K, Matsuo H, Ishida K, Iwasaki K-i, Miyamura MJEJoap. Effect of intermittent hypoxia on oxygen uptake during submaximal exercise in endurance athletes. *Eur J Appl Physiol.* 2004;92(1-2):75-83.
8. Billaut F, Buchheit M. Repeated-sprint performance and vastus lateralis oxygenation: Effect of limited O₂ availability. *Scand J Med Sci Sports.* 2013;23(3):e185-e93.
9. Brocherie F, Millet GP, Morin J-B, Girard O. Mechanical alterations to repeated treadmill sprints in normobaric hypoxia. *Med Sci Sports Exerc.* 2016;48(8):1570-9.
10. Deb SK, Brown DR, Gough LA, McLellan CP, Swinton PA, Andy Sparks S, et al. Quantifying the effects of acute hypoxic exposure on exercise performance and capacity: a systematic review and meta-regression. *Eur J Sport Sci.* 2018;18(2):243-56.
11. Foster C, Florhaug JA, Franklin J, Gottschall L, Hrovatin LA, Parker S, et al. A new approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res.* 2001;15(1):109-15.
12. Kuipers H, Verstappen F, Keizer H, Geurten P, Van Kranenburg GJJosm. Variability of aerobic performance in the laboratory and its physiologic correlates. *Int J Sports Med.* 1985;6(4):197-201.
13. Millet GP, Brocherie F, Girard O, Wehrli JP, Troesch S, Hauser A, et al. Commentaries on Viewpoint: Time for a new metric for hypoxic dose?. *J Appl Physiol (1985).* 2016;121(1):356-8.
14. Gadrey SM, Lau CE, Clay R, Rhodes GT, Lake DE, Moore CC, et al. Imputation of partial pressures of arterial oxygen using oximetry and its impact on sepsis diagnosis. *Physiol Meas.* 2019;40(11):115008.
15. Moon H-W, Shin S-H, Lee C-H, Park H-Y, Sunoo S, Nam S-S. Effects of various acute hypoxic conditions on the hemorheological response during exercise and recovery 1. *Clinical hemorheology and microcirculation.* Clin Hemorheol Microcirc. 2016;63(4):451-60.
16. Richardson RS, Duteil S, Wary C, Wray DW, Hoff J, Carlier PGJTJop. Human skeletal muscle intracellular oxygenation: the impact of ambient oxygen availability. *J Physiol.* 2006;571(2):415-24.
17. Richardson RS, Noyszewski EA, Kendrick KF, Leigh JS, Wagner PDJTJoci. Myoglobin O₂ desaturation during exercise. Evidence of limited O₂ transport. *J Clin Invest.* 1995;96(4):1916-26.
18. Flueck M. Plasticity of the muscle proteome to exercise at altitude. *High Alt Med Biol.* 2009;10(2):183-93.
19. Graham AM, McCracken KG. Convergent evolution on the hypoxia-inducible factor (HIF) pathway genes EGLN1 and EPAS1 in high-altitude ducks. *Heredity (Edinb).* 2019;122(6):819-32.
20. Fernández-Torres J, Martínez-Nava GA, Gutiérrez-Ruiz MC, Gomez-Quiroz LE, Gutiérrez-MJRBD. Papel da via de sinalização do HIF-1 α na osteoartrite: revisão sistemática. *Rev Bras Reumatol.* 2017;57(2):162-73.
21. Lindholm ME, Rundqvist HJEp. Skeletal muscle hypoxia-inducible factor-1 and exercise. *Exp Physiol.* 2016;101(1):28-32.
22. Bärtsch P, Dehnert C, Friedmann-Bette B, Tadibi VJSJoM, Sports Si. Intermittent hypoxia at rest for improvement of athletic performance. *Scand J Med Sci Sports.* 2008;18(Suppl):50-6.
23. Richardson RS, Knight DR, Poole DC, Kurdak SS, Hogan MC, Grassi B, et al. Determinants of maximal exercise VO₂ during single leg knee-extensor exercise in humans. *Am J Physiol.* 1995;268(4):H1453-H61.
24. Millet G, Bentley DJ, Roels B, Mc Naughton LR, Mercier J, Cameron-Smith DJPo. Effects of intermittent training on anaerobic performance and MCT transporters in athletes. *PLoS One.* 2014;9(5):e95092.
25. Garvican-Lewis LA, Sharpe K, Gore CJ. Time for a new metric for hypoxic dose?. *J Appl Physiol.* 2016;121(1):352-5.
26. Chapman RF. The individual response to training and competition at altitude. *Br J Sports Med.* 2013;47(Suppl 1):i40-i44.
27. Girard O, Brocherie F, Millet GP. Effects of altitude/hypoxia on single- and multiple-sprint performance: a comprehensive review. *Sports Med.* 2017;47(10):1931-49.
28. Hochachka P, Beatty C, Burelle Y, Trump M, McKenzie D, Matheson G. The lactate paradox in human high-altitude physiological performance. *News Physiol Sci.* 2002;17:122-6.
29. Paris HL, Sinai EC, Shei R-J, Keller AM, Mickleborough TDJEJoSS. The influence of carbohydrate ingestion on peripheral and central fatigue during exercise in hypoxia: a narrative review. *Eur J Sport Sci.* 2021;21(10):1423-35.
30. Manzi V, Iellamo F, Impellizzeri F, D'ottavio S, Castagna CJMSSE. Relation between individualized training impulses and performance in distance runners. *Med Sci Sports Exerc.* 2009;41(11):2090-6.